

## Литература

1. Брылин В.И. Технология бурения и оборудование эксплуатационных скважин при отработке месторождений урана методом подземного выщелачивания. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 218 с.
2. Методы и средства исследования: учебное пособие / Н. Г. Квеско, П. С. Чубик; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 124 с.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШАРОСТРУЙНО-ЭЖЕКТОРНЫХ СНАРЯДОВ С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИХ РАСЧЕТА

Т.Е. Константинов, Е.Д. Исаев

Научный руководитель ассистент А.В. Ковалев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В Томском политехническом университете на кафедре бурения скважин проводятся исследования шароструйно-эжекторных буровых снарядов (ШЭБС). Ключевым вопросом является разработка геометрических параметров ШЭБС. Для этого были разработаны лабораторный стенд [1] и методика проведения экспериментальных исследований. При этом впервые для шароструйного бурения использовалась высокоскоростная съемка.

На рис. 1. представлена конструкция ШЭБС, с возможностью смены составных частей долота.

Ранее был проведен литературный обзор [2], который выявил значительное количество различных методик расчета струйных аппаратов. Одним из основных геометрических параметров скважины, характеризующий эффективность бурения является объем скважины  $V_{скв}$ . Объем скважины определяется по формуле:

$$V_{скв} = V_{ш} \cdot N \cdot t \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $V_{ш}$  – объем воронки разрушения при ударе одного шара;  $N$  – количество соударений шаров с забоем за единицу времени;  $t$  – время бурения;  $\rho$  – коэффициент, учитывающий снижение скорости разрушения в реальных условиях.

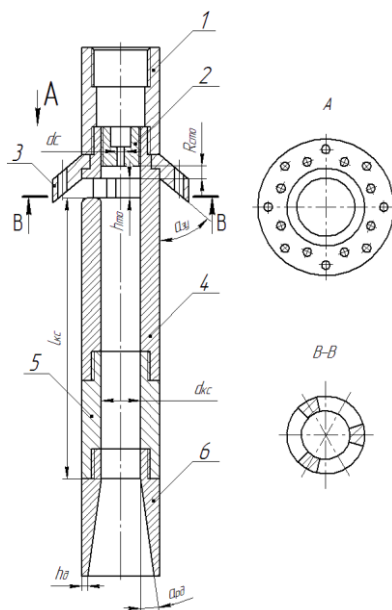


Рис. 1. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд: 1 – переходник на нагнетательную магистраль; 2 – сопло; 3 – задерживающее устройство; 4 – камера всасывания; 5 – камера смешения; 6 – диффузор;  $d_c$  – диаметр сопла;  $R_{стo}$  – расстояние между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон;  $h_{мо}$  – высота технологических окон;  $\alpha_{зy}$  – угол конусности задерживающего устройства;  $l_{кc}$  – длина камеры смешения;  $d_{кc}$  – диаметр камеры смешения;  $\alpha_{рo}$  – угол раскрытия диффузора;  $h_{д}$  – толщина стенки диффузора.

#### Исследование влияния расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон на эффективность шароструйного бурения

При оптимальных значениях расстояния между долотом и забоем, диаметра и массы порции шаров было проведено исследование влияния расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон на эффективность разрушения мрамора при бурении скважин с расхаживанием бурового снаряда при следующих исходных параметрах:  $d''_{oc}=16$  мм,  $d_{кc}=8$  мм,  $d_c=2$  мм,  $\alpha_{зy}=40^\circ$ ,  $h_{мо}=4,2$  мм,  $l_{кc}=60$  мм,

$\alpha_{pd}=10^\circ$ ,  $h_0=1$  мм,  $d_{ш}=3,5$  мм,  $m_{ш}=20$  г,  $R_{03}=5$  мм,  $Q_p=6,7$  л/мин,  $t_{pac}=5$  мин,  $t=40$  мин, горная порода: мрамор, промывочная жидкость: вода

По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин (табл. 1). По таблице видно, что увеличение расстояния в исследуемом диапазоне мало влияет на диаметр скважины. Однако объем и глубина скважины при увеличении расстояния довольно интенсивно уменьшаются.

Для выявления причин уменьшения эффективности шароструйного бурения при увеличении расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон при вышеописанных условиях проведена высокоскоростная съемка. Результаты обработки видеофайлов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Влияние расстояния между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон на эффективность шароструйного бурения. Расход и скорость шаров в камере смешения**

Расстояние между соплом и верхним срезом окон, мм	Геометрические параметры скважины					Результаты высокоскоростной съемки	
	Объем скважины, мм <sup>3</sup>	Диаметр скважины, мм	Глубина цилиндрической части скважины, мм	Глубина в точке соприкосновения долота с забоем, мм	Глубина скважины, мм	Расход шаров, ш/с	Скорость шаров в камере смешения, м/с
0	30800	25	57,2	65,8	70,8	1084	8,387
3	24100	24,9	46	54,5	58	1055	7,778
6	21370	24,8	39,1	48,1	51,2	1050	6,457

Полученные результаты показывают, что при увеличении расстояния при относительно постоянном значении расхода шаров их скорость в камере смешения уменьшается. Это связано с уменьшением коэффициента эжекции снаряда. Уменьшение скорости шаров ведет к уменьшению объема и глубины скважины, что подтверждается результатами, полученными при забурке скважины и бурении с расхаживанием бурового снаряда.

**Исследование влияния высоты технологических окон на эффективность шароструйного бурения**

Было проведено исследование влияния высоты технологических окон на эффективность разрушения мрамора при бурении скважин с расхаживанием бурового снаряда с шагом  $1,25 \cdot d_{ш}$ ;  $1,75 \cdot d_{ш}$ ;  $2,25 \cdot d_{ш}$ . Полученные результаты сведены в табл. 2. По таблице видно, что увеличение высоты окон в исследуемом диапазоне мало влияет на диаметр скважины, а объем и глубина скважины при увеличении высоты окон незначительно уменьшаются.

Для интерпретации полученных результатов была проведена высокоскоростная съемка. Обработка полученных видеофрагментов позволила посчитать расход и скорость шаров в камере смешения при бурении снарядами с различной высотой окон (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние высоты окон на эффективность шароструйного бурения. Расход и скорость шаров в камере смешения**

Высота окон, мм	Геометрические параметры скважины					Результаты высокоскоростной съемки	
	Объем скважины, мм <sup>3</sup>	Диаметр скважины, мм	Глубина цилиндрической части скважины, мм	Глубина в точке соприкосновения долота с забоем, мм	Глубина скважины, мм	Расход шаров в камере смешения, ш/с	Скорость шаров в камере смешения, м/с
4,2	34180	25,4	62,9	70,1	74,1	1188	9,445
6,1	30800	25	57,2	65,8	70,8	1154	9,226
7,8	28900	25,2	53,3	60,6	65,2	1166	8,939
Исходные данные: $d_{bc}^H=16$ мм, $d_{kc}=8$ мм, $d_c=2$ мм, $\alpha_{3y}=40^\circ$ , $l_{kc}=40$ мм, $\alpha_{pd}=10^\circ$ , $h_0=1$ мм, $d_{ш}=3,5$ мм, $m_{ш}=20$ г, $R_{03}=5$ мм, $Q_p=6,7$ л/мин, $t_{pac}=5$ мин, $t=40$ мин, горная порода: мрамор, промывочная жидкость: вода							

По таблице видно, что при увеличении высоты окон при относительно постоянном значении расхода шаров их скорость в камере смешения уменьшается. Анализ видеофрагментов показал, что с увеличением высоты окон в области под задерживающим устройством увеличивается количество скопившихся для

последующего всасывания шаров. Последнее приводит к уменьшению коэффициента эжекции снаряда, следовательно, уменьшению скорости шаров в камере смешения. Уменьшением скорости шаров объясняется уменьшение объема и глубины скважины.

#### Исследование влияния длины камеры смешения на эффективность шароструйного бурения

Для определения оптимальной длины камеры смешения в ряду длин  $5 \cdot d_{кс}$ ;  $7,5 \cdot d_{кс}$ ;  $10 \cdot d_{кс}$ ;  $12,5 \cdot d_{кс}$ ;  $15 \cdot d_{кс}$ ;  $17,5 \cdot d_{кс}$  предварительно были выявлены значения оптимальных масс порции шаров при забурке скважины. Стоит отметить, что оптимальная масса порции шаров при увеличении длины камеры смешения увеличивается, что связано с большим объемом бурового снаряда и затрубного пространства.

Экспериментальные исследования влияния длины камеры смешения на эффективность разрушения проводились при бурении скважин в образцах мрамора с расхаживанием снаряда.

Исходные данные:  $d_{\sigma c}^{\prime}=16$  мм,  $d_{кс}=8$  мм,  $d_c=2$  мм,  $\alpha_{зв}=40^\circ$ ,  $h_{мо}=6,1$  мм,  $\alpha_{р\partial}=10^\circ$ ,  $h_{\partial}=1$  мм,  $d_{и}=3,5$  мм,  $R_{\partial 3}=5$  мм,  $Q_p=6,7$  л/мин,  $t_{рас}=5$  мин,  $t=40$  мин, горная порода: мрамор, промывочная жидкость: вода

По полученным данным построены графики зависимости диаметра, объема (рис. 2) и глубины (рис. 3) скважины от длины камеры смешения. Анализ графиков показывает, что с увеличением длины камеры смешения уменьшается диаметр скважины и ее объем. Максимальная глубина скважины зафиксирована при бурении буровыми снарядами с длиной камеры смешения, равной 40 и 60 мм.

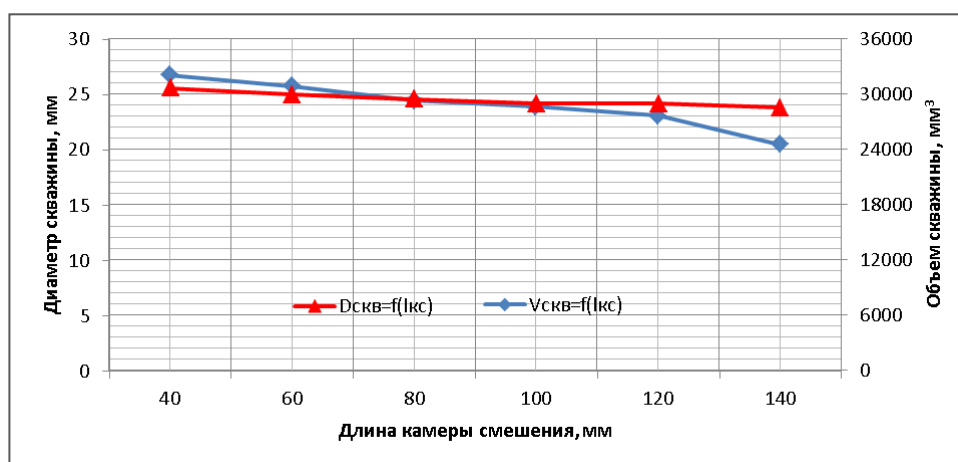


Рис. 2. Зависимость диаметра и объема скважины от длины камеры смешения

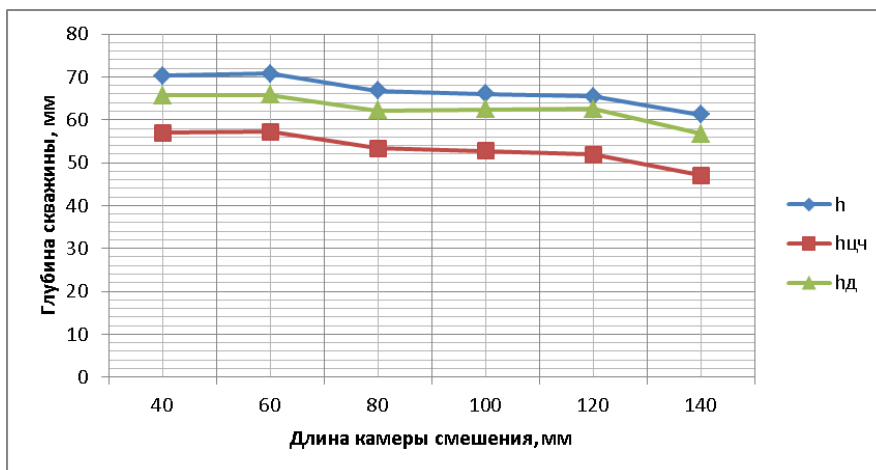


Рис. 3. Зависимость глубины скважины от длины камеры смешения

Для интерпретации вышеописанных результатов была проведена высокоскоростная съемка, результаты которой представлены в табл. 3.

Таблица 3

#### Расход и скорость шаров в камере смешения при разных значениях ее длины

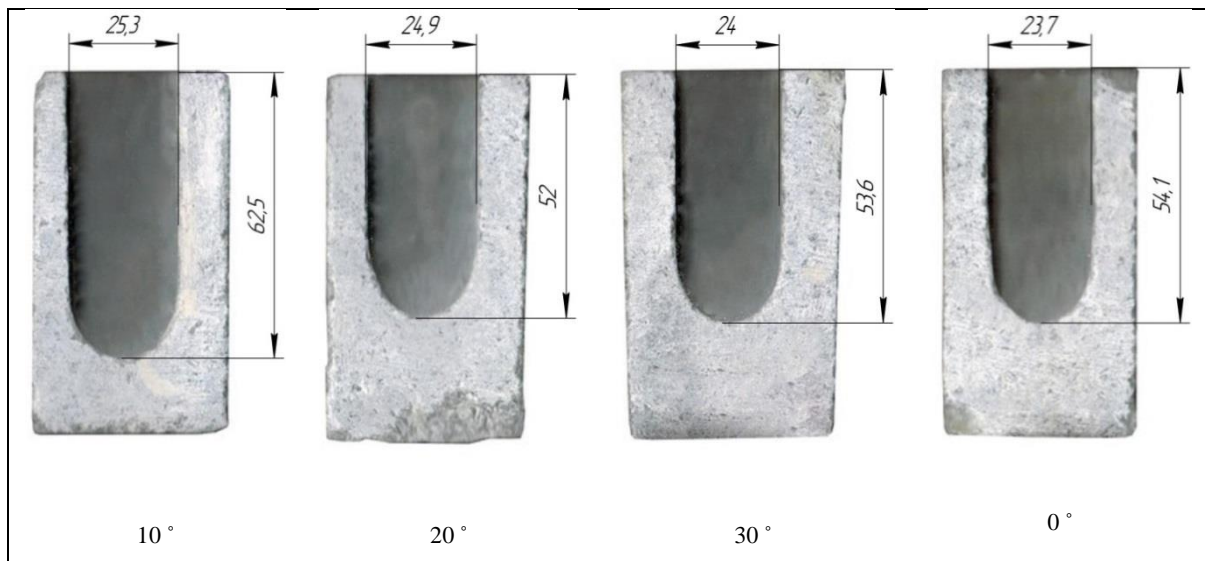
Длина камеры смешения, мм	40	60	80
Расход шаров в камере смешения, ш/с	1084	1020	967
Скорость шаров в камере смешения, м/с	8,387	7,597	7,361

Анализ данных, представленных в табл. 3, указывает на уменьшение скорости шаров в камере смешения при увеличении ее длины, что поясняется большим количеством рикошетов о ее стенки. К тому же, согласно результатам американских исследователей, увеличение длины камеры смешения ведет к уменьшению коэффициента эжекции. Уменьшение скорости шаров в камере смешения приводит к уменьшению скорости их подъема в затрубном пространстве, тем самым, к меньшему расходу шаров.

**Исследование влияния угла раскрытия диффузора на эффективность шароструйного бурения**

Исследования влияния угла раскрытия диффузора на эффективность разрушения мрамора проводились при бурении скважин с расхаживанием снаряда с периодичностью  $t_{рас}$  при следующих исходных параметрах:  $d_{ос}^н=16$  мм,  $d_{кс}=8$  мм,  $d_c=2$  мм,  $\alpha_{зп}=40^\circ$ ,  $h_{мо}=4,2$  мм,  $l_{ос}=60$  мм,  $h_o=1$  мм,  $d_{ш}=3,5$  мм,  $m_{ш}=20$  г,  $R_{дз}=5$  мм,  $Q_p=6,7$  л/мин,  $t_{рас}=5$  мин,  $t=30$  мин, горная порода: мрамор, промывочная жидкость: вода. Форма забоя скважины представлена на рис. 4.

По экспериментальным данным видно, что при угле раскрытия диффузора, равного  $10^\circ$  диаметр, глубина и объем скважины максимален. Диаметр скважины в ряду  $10^\circ-20^\circ-30^\circ-0^\circ$  уменьшается.



**Рис. 4. Форма скважин при варьировании угла раскрытия диффузора**

Была проведена видеорегистрация процесса бурения при варьировании угла раскрытия диффузора. Результаты высокоскоростной съемки представлены в табл. 4.

**Таблица 4**

**Расход и скорость шаров в камере смешения при разных значениях углов раскрытия диффузора**

Угол раскрытия диффузора, °	10	20	30	0
Расход шаров в камере смешения, шт/с	1084	1041	1011	890
Скорость шаров в камере смешения, м/с	8,387	7,668	6,884	6,728

Полученные данные показывают, что в ряду  $10^\circ-20^\circ-30^\circ-0^\circ$  уменьшается расход шаров в камере смешения, что связано с образованием скоплений шаров между буровым снарядом и забоем скважины. Уменьшение скорости шаров в камере смешения связано с возрастанием количества рикошетов о стенки бурового снаряда в нижней области.

**Исследование влияния диаметра сопла на эффективность шароструйного бурения**

В табл. 5 представлены измеренные основные параметры струйного аппарата с первичными соплами разных диаметров при неизменном диаметре камеры смешения. Анализ данных показал, что при увеличении значения геометрического параметра струйного аппарата, т.е. при уменьшении диаметра сопла, увеличивается его коэффициент эжекции. В связи с использованием центробежного насоса с гибкой напорно-расходной характеристикой с уменьшением диаметра сопла увеличивается давление перед соплом, следовательно, уменьшается расход рабочего потока.

Таблица 5

Основные параметры струйного аппарата при варьировании диаметра сопла

Диаметр сопла $d_c$ , мм	Давление перед соплом $P_c$ , МПа	Расход рабочего потока $Q_p$ , л/мин	Расход смешанного потока $Q_c$ , л/мин	Основной геометрический параметр $m$	Коэффициент эжекции $n_{эж}$
2	1,1	6,7	30,6	16	3,563
2,5	0,95	9,8	32,824	10,24	2,349
3	0,8	12,8	35,5	7,111	1,773
3,5	0,75	15,8	42,12	5,224	1,659
4	0,65	16,9	30,3	4	0,791

На следующем этапе проводилось сравнение эффективности разрушения долотами с различными диаметрами сопел. В связи с необходимостью определения оптимальной массы порции шаров эксперименты проводились при ее варьировании. При этом производилась забурка скважины при следующих условиях:  $d_{нбс}=16$  мм,  $d_{кс}=8$  мм,  $\alpha_{зу}=40^\circ$ ,  $h_{то}=4,2$  мм,  $l_{кс}=40$  мм,  $\alpha_{рд}=10^\circ$ ,  $h_d=1$  мм,  $d_{ш}=3,5$  мм,  $R_{дз}=5$  мм,  $t=1$  мин, разрушаемый материал: керамическая плитка, промывочная жидкость: вода. По полученным экспериментальным данным построен график (рис. 5).

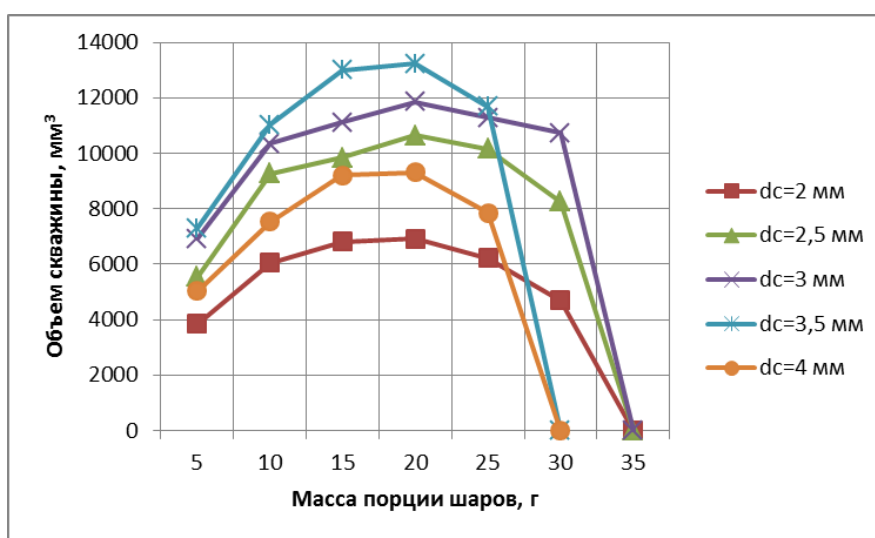


Рис. 5. Зависимость объема скважины от массы порции шаров при различных значениях диаметра сопел

Приведенный график показывает, что в ряду диаметров сопел 2–2,5–3–3,5 мм объем скважины возрастает, при диаметре сопла 4 мм – падает. Вместе с тем, критическая масса порции шаров при диаметрах сопел, равных 3,5 и 4 мм, падает, что связано с маленькими значениями коэффициента эжекции при этом. Важным является тот факт, что оптимальная масса порции шаров в исследуемом диапазоне изменения диаметра сопел является постоянной.

На следующем этапе была проведена высокоскоростная съемка. Обработка полученных видеофрагментов позволила посчитать расход и скорости шаров в камере смешения при бурении снарядами с различным диаметром сопел (табл. 6).

Таблица 6

Расход и скорость шаров в камере смешения, отношение скорости шаров к рассчитанной скорости жидкости без шаров при разных значениях диаметра сопла

Диаметр сопла, мм	2	2,5	3	3,5	4
Расход шаров в камере смешения, ш/с	1084	1118	1224	1368	1120
Скорость шаров в камере смешения, м/с	8,387	9,445	9,616	10,015	8,046
Рассчитанная скорость жидкости без шаров, м/с	10,151	10,889	11,777	13,973	10,05
Отношение скорости шаров к скорости жидкости	0,826	0,867	0,816	0,716	0,8

Анализируя данные съемок, можно заметить, что в ряду диаметров сопел 2–2,5–3–3,5 мм увеличивается скорость шаров в камере смешения, что объясняется увеличением скорости смешанного потока в камере смешения.

Увеличение скорости шаров в камере смешения приводит к увеличению их расхода. Таким образом, экспериментально определились предположения Увакова А.Б. [3] и Заурбекова С.А. [4]. Это связано с тем, что в момент подсосывания шаров в технологические окна при больших скоростях смешанного потока шары быстрее покидают верхнюю область бурового снаряда, не препятствуя поступлению других шаров.

На основе данных, представленных в табл. 5, удалось посчитать отношение скорости шаров к скорости промывочной жидкости в камере смешения (табл. 6). Следует отметить, что при диаметре сопла, равном 3,5 мм, наблюдается уменьшение отношения скорости шаров к скорости промывочной жидкости в камере смешения, что объясняется значительным увеличением расхода шаров при этом.

На основе проделанных экспериментов при проектировании буровых снарядов рекомендуется использовать следующие соотношения между геометрическими параметрами:

1. расстояние между выходным сечением сопла и верхним срезом технологических окон принять равным 0 мм, так как при таком значении расстояния скорость шаров в камере смешения максимальна;
2. высоту технологических окон принять равным 4,2 мм, так как чем меньше высота технологических окон, тем больше коэффициент эжекции, следовательно больше скорость шаров в камере смешения;
3. длину камеры смешения принять равным 40 мм, так как с увеличением длины камеры смешения уменьшается скорость шаров за счет увеличения числа рикошетов, что так же приводит к уменьшению скорости подъема шаров в затрубном пространстве и расхода шаров;
4. угол раскрытия диффузора принять равным 10°, так как в ряду 10°–20°–30°–0° диаметр скважины уменьшается. Это связано с траекторией движения шаров в снаряде;
5. диаметр сопла принять равным 3,5 мм, так как при этом значении диаметра сопла расход жидкости и скорость шаров максимальны.

#### Литература

1. Патент № 143090, Е 21 В 7/18. Стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения / А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков и др. – № 2014106459/03; Заявлено 20.02.2014; Опубл. 10.07.2014.
2. Ковалев А.В., Симон А.А., Яцкив А.А., Исаев Е.Д. Исследование влияния геометрических параметров шароструйно-эжекторных буровых снарядов на эффективность их работ // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова. Том II; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. - С. 408-411
3. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
4. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.

### РАЗРАБОТКА УЛАВЛИВАЮЩЕ–ПОДПИТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕЙСОВОЙ СКОРОСТИ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ

**А.В. Ковалев, Е.Д. Исаев, В.В. Урниш**

Научный руководитель ассистент А.В. Ковалев

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия**

В настоящее время на кафедре бурения скважин Томского политехнического университета проводятся теоретические и экспериментальные исследования шароструйного способа бурения, который может дать значительный прирост скорости бурения в твердых и крепких горных породах, увеличить проходку на долото. Кроме того, шароструйный способ бурения легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами с промывкой и не потребует значительного переоборудования буровой установки.

Шароструйный способ бурения основан на разрушении горных пород посредством воздействия металлических шаров, обладающих большой кинетической энергией непосредственно перед контактом с породой и многократно циркулирующих в призабойной зоне скважины за счет струйного аппарата, положенного в основу конструкции шароструйно-эжекторного долота.